



Analyse spatialisée pour l'aide à la planification des projets de méthanisation collective

T. Bioteau, F. Béline, François Laurent, R. Girault, O. Tretyakov, F. Boret,
M Balynska

► To cite this version:

T. Bioteau, F. Béline, François Laurent, R. Girault, O. Tretyakov, et al.. Analyse spatialisée pour l'aide à la planification des projets de méthanisation collective. Sciences Eaux & Territoires, 2013, 12, p. 34 - p. 41. 10.14758/SET-REVUE.2013.12.07 . hal-00873432

HAL Id: hal-00873432

<https://hal.science/hal-00873432>

Submitted on 15 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse spatialisée pour l'aide à la planification des projets de méthanisation collective

Le développement de la méthanisation dépend de plusieurs facteurs. Il s'agit, entre autres, des ressources disponibles, de leur proximité, des caractéristiques de l'économie locale et de leur impact sur le processus de décision. Ces éléments doivent nécessairement être pris en compte pour une mise en place pertinente de centres de production de biogaz. L'analyse menée en Pays de Fougères envisage tous ces points et permet de dégager différents scénarii.



Le monde agricole montre un intérêt croissant pour la valorisation par méthanisation (ou digestion anaérobie) des résidus organiques générés par l'élevage et les cultures. L'enjeu est double : le traitement des effluents d'élevage et la diversification du panel d'énergies renouvelables français. En effet un engagement a été pris par les États membres de l'Union européenne fixé par la directive européenne 28/CE/2009 afin d'atteindre 20 % d'énergie renouvelable dans la consommation totale d'énergie finale en 2020. En France, cet engagement s'est traduit en 2011 par une incitation sous la forme d'une réévaluation du tarif de rachat de l'électricité issue du biogaz et à l'autorisation d'injection du biogaz dans le réseau de gaz naturel. La cartographie des installations de méthanisation tenue à jour par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME – figure ❶) met en évidence un développement de la méthanisation collective, dite aussi centralisée, qui consiste à réunir différents acteurs du territoire tels que agriculteurs, gestionnaires de déchets issus des collectivités, industriels, afin de mutualiser des déchets et des effluents agricoles au sein d'une unité commune de traitement par digestion anaérobie de la matière organique. Les enjeux peuvent être de différentes natures selon les partenaires :

- traitement de déchets gras difficiles à composer en l'état,
- valorisation de la chaleur par séchage du digestat, permettant ainsi son exportation dans un contexte d'excédent structurel en azote,
- diversification de la filière « gestion et traitement des déchets » qui incombe aux collectivités.

Un lieu d'implantation est défini en concertation et supporté par le collectif. Cette coopération entre acteurs permet de maximiser la production d'énergie par la complémentarité des substrats en mélange et de réaliser des

économies d'échelle liées à la taille des installations. Le biogaz produit peut être valorisé de différentes manières :

- cogénération,
- injection du biogaz dans le réseau de gaz naturel après compression et épuration,
- gaz naturel pour véhicules (GNV).

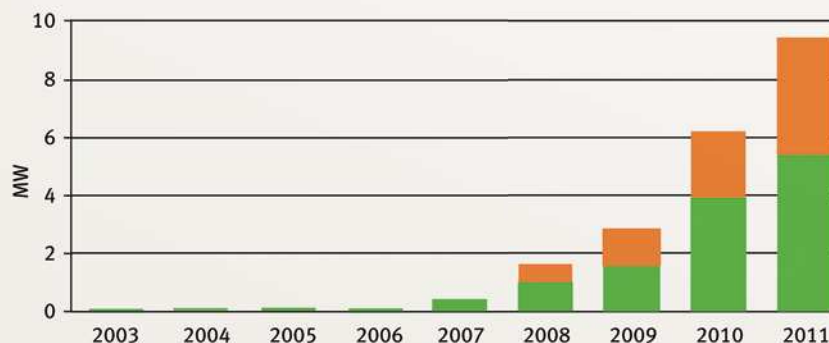
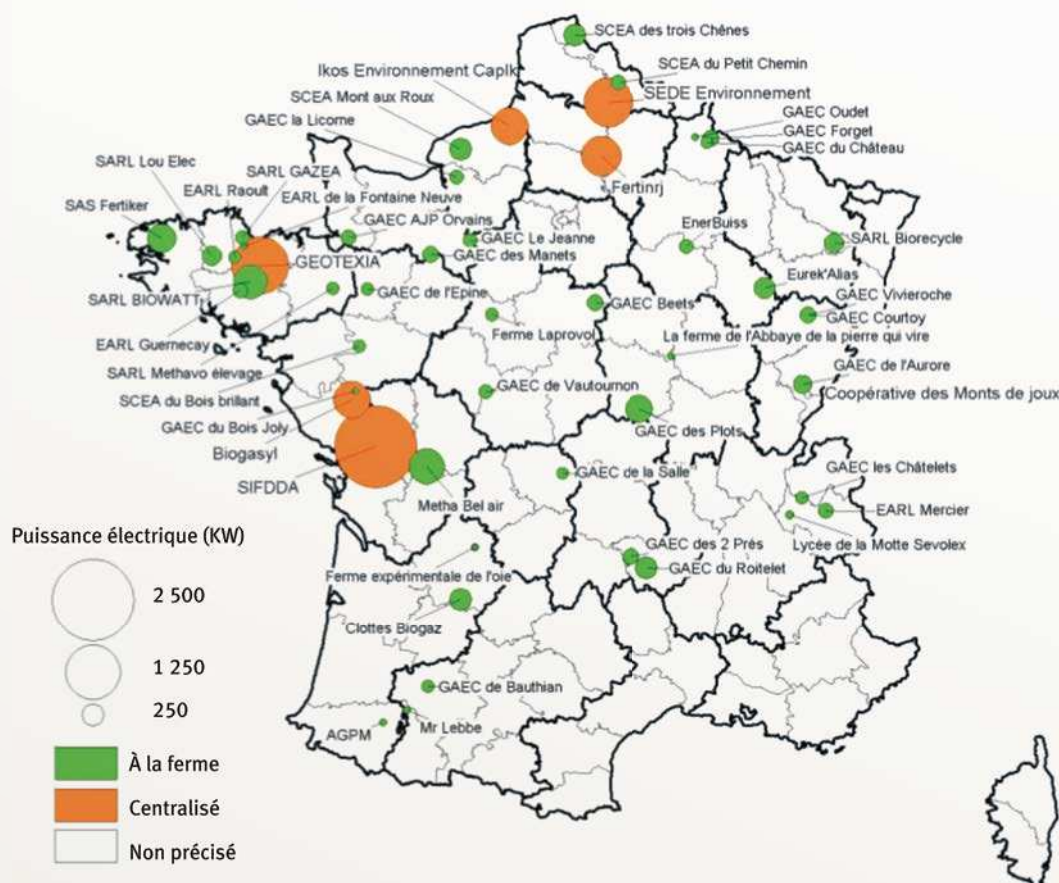
Dans un contexte de développement de ces installations de méthanisation collectives, le recours à des déchets agro-alimentaires, des boues de stations d'épuration, des déchets de restauration, en complément des effluents d'élevage, est fréquent (figure ❷). Ces différents substrats peuvent être collectés à des distances variables en fonction de leur intérêt énergétique. Aussi, afin de bien évaluer l'intérêt économique et environnemental d'un tel projet de développement territorial, il est nécessaire de réaliser une étude préalable des ressources disponibles et de leur accessibilité.

Pour cela, les systèmes d'information géographique (SIG) constituent une aide pertinente pour la phase de réflexion initiale d'un projet. Des modèles peuvent être élaborés en croisant des contraintes et des facteurs favorables (Ma *et al.*, 2005).

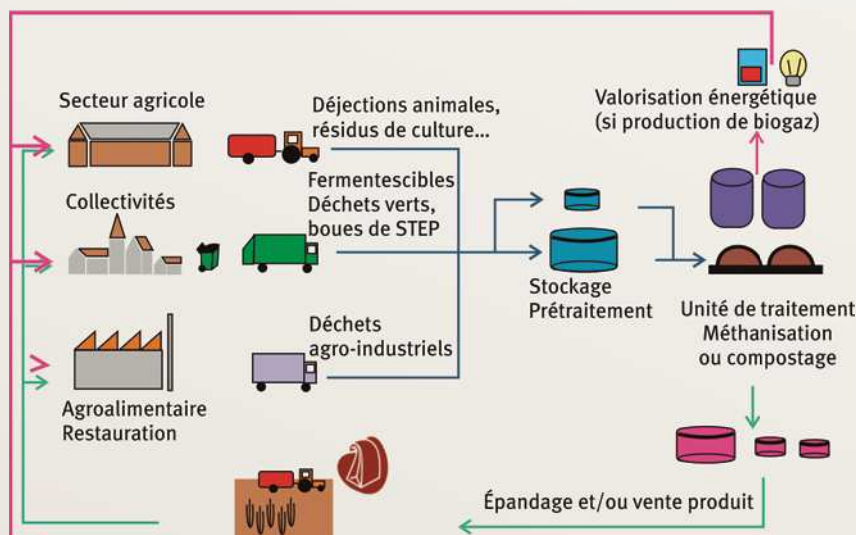
L'inventaire spatialisé des bio-ressources

La particularité de la méthodologie développée ici est d'être adaptée à l'échelle locale et de prendre en compte la majorité des substrats disponibles sur le territoire du Pays de Fougères, zone rurale de 1 000 km² et de 82 000 habitants, située au nord-est de la région Bretagne. Cette approche a abouti à la construction d'un outil de simulation spatialisé pour localiser précisément les ressources potentielles et déterminer les zones préférentielles d'implantation d'une unité de méthanisation. Si les méthodes développées se veulent reproductibles, la spécificité de l'économie locale a une influence sur




❶ Localisation et puissance cumulée des installations de méthanisation en France. Source : ADEME et Club Biogaz ATEE (2011).



❷ Unités centralisées de méthanisation ou de compostage. Source : ADEME.



❶ Clés de détermination pour l'identification des bâtiments d'élevage.

| Bovins | Porcins | Volailles |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • couloirs à ensilage de maïs, • toits des bâtiments avec lumière naturelle, • prairies à proximité, • traces de passage d'animaux, • présence éventuelle de fumière, • distinction possible entre bâtiment d'élevage et bâtiment de stockage de matériel agricole par la hauteur des bâtiments indiquée dans la BDTOPO®. | <ul style="list-style-type: none"> • présence d'une fosse extérieure de stockage du lisier à proximité des bâtiments, • absence d'éclairage naturel, • absence de couloir à ensilage, • présence de silos à grains. | <ul style="list-style-type: none"> • absence de fosse extérieure, • absence d'éclairage naturel, • absence de couloir à ensilage • surface des bâtiments souvent standardisée (400, 800, 1 600, 2 400 m²) • silos à grains souvent visibles sur un côté du bâtiment • forme allongée du bâtiment. |
|  |  |  |
| Fumières Ensilage | Ventilation Silo | Silos |
| ■ Bâtiment d'élevage | | ● Fosse extérieure |

le choix et la répartition des bio-ressources. Le territoire du Pays de Fougères comporte les gisements potentiels suivants :

- effluents d'élevage,
- résidus de cultures,
- déchets des industries agroalimentaires (IAA),
- déchets de restauration collective (restes de repas),
- fraction fermentescible d'ordures ménagères (FFOM),
- déchets verts,
- boues des stations d'épuration des eaux usées (STEP).

Les effluents d'élevage et les résidus de cultures constituent une ressource importante sur le territoire du Pays de Fougère marqué par une activité d'élevage importante et diversifiée. Les déchets des IAA représentent un gisement à fort potentiel énergétique qui a été considéré dans l'inventaire. De même, les déchets de restauration collective constitués par les déchets de préparation et les restes de repas sont une ressource à considérer, la valorisation de ce type de déchets étant peu développée. Les bio-ressources qui disposent d'une filière existante de traitement ont été considérés différemment selon les cas. La fraction fermentescible des ordures ménagères a été exclue de l'inventaire du fait du faible gisement potentiel et des coûts prévisionnels d'une collecte spécifique. Les déchets verts ont été considérés, avec un gisement localisé aux lieux de dépôts des déchèteries. En effet, les apports des ménages en déchèterie suivent une évolution à la hausse depuis une dizaine d'années, occasionnant parfois des difficultés de traitement ainsi que des coûts à la charge des collectivités en augmentation. Détourner partiellement ce gisement, notamment les apports en tontes de pelouses, pourraient constituer une réponse à

cette situation, sans modification importante de la filière existante. De même, les boues de STEP ont été prises en compte dans l'inventaire des ressources potentielles. En effet, la disponibilité des terres pour l'épandage agricole des boues est parfois limité et la méthanisation peut constituer une réponse à cette contrainte par diminution des volumes à épandre. La géolocalisation et l'estimation des volumes produits issus des IAA et de la restauration collective ont été obtenus par enquêtes spécifiques. Déchets verts et boues de STEP, ont été géolocalisés par exploitation de données existantes disponibles sur des sites spécialisés (<http://www.sinoe.org>, <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr>). Les ressources agricoles ont, quant à elles, nécessité le développement de méthodologies d'analyses spatiales adaptées à une échelle locale, ci-après détaillées.

Évaluation des effluents d'élevage par photo-interprétation

Pour le territoire d'étude, dont la spécialisation agricole est l'élevage, il est aisé de calculer le potentiel énergétique en se basant sur les densités animales disponibles auprès de l'Agreste. Par contre, compte-tenu des règles de secret statistique actuelles, il est difficile d'obtenir une échelle des résultats plus précise que celle des cantons. Une première évaluation du potentiel énergétique a donc été réalisée à cette échelle, puis répartie localement à l'échelle des exploitations agricoles proportionnellement à leur taille. Le type ainsi que la taille des bâtiments d'élevage ont été identifiés par photo-interprétation. L'exercice consiste à réaliser une digitalisa-

tion des bâtiments abritant les animaux. La BD TOPO® de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) est un bon support en plus de la BD ORTHO® puisqu'un thème « bâtiment industriel » y est présent avec une catégorie « bâtiments agricoles ». La surface des bâtiments est calculée de manière immédiate par une fonction intrinsèque au SIG dès lors que les données sont géoréférencées. Des clés de détermination sont détaillées sur le tableau ❶ afin d'identifier rapidement les types d'élevages avant digitalisation des surfaces de bâtiments. Une personne initiée aux types d'élevage réalise une photo-interprétation de l'ordre de 300 km²/semaine.

L'information est stockée au sein d'une base de donnée spatialisée en mettant en relation trois entités géographiques : ateliers de production, fosses, bâtiments (tableau ❶). Si l'information sur les bâtiments est l'information principale pour répartir la densité animale cantonale, les fosses extérieures pourront néanmoins renseigner une contrainte technique pour la phase de modélisation spatiale avec choix d'un scénario de méthanisation par voie liquide (contrainte de 10-15 % de matière sèche maximum). La conversion des données de cheptels cantonaux en quantités d'effluents produits est réalisée en considérant pour les bovins 60 % de temps de présence en bâtiment et en utilisant la valeur fournie par le Corpen de 15 t/an de fumier par unité gros bovin (UGB). Pour les lisiers porcins, une valeur de 15,4 m³/an de lisier produit par une truie et sa suite a été considérée. Les effluents avicoles ont été exclus. En effet, les fientes sèches, majoritaires, ont une voie de valorisation existante et sont déconseillées pour un usage par méthanisation.

Résidus de cultures – Identification à l'aide d'une série d'images Landsat

La réglementation européenne (CE n° 1593/2000) impose, dans tous les États membres, de localiser et d'identifier les parcelles agricoles. Pour répondre à cette exigence, la France a mis en place le registre parcellaire graphique (RPG) qui est une application géographique en ligne accessible aux exploitants agricoles qui doivent identifier leurs parcelles et leurs cultures. Ensuite, les données géographiques sont téléchargeables gratuitement pour les utilisateurs sur le site <http://www.data.gouv.fr/>. Malheureusement, certaines cultures ne sont pas définies suffisamment précisément dans un objectif d'inventaire de résidus de récolte. La culture du maïs est indiquée sans différenciation du maïs grain et du maïs d'ensilage alors que ces deux cultures sont très différentes en termes de résidus potentiels. Pour un diagnostic local, il a donc été nécessaire de distinguer ces deux pratiques agricoles à l'aide de techniques de télédétection (analyse des chroniques de l'imagerie Landsat). Cette technique permet de pallier le manque d'informations provenant du RPG. L'utilisation d'une image Landsat datant du mois d'octobre (figure ❸) permet, sur le territoire d'étude, la distinction entre l'ensilage de maïs (récolté) et le maïs grain (non récolté). Les autres résidus de cultures ont été estimés à l'aide de la méthodologie développée par Almansour *et al.* (2010).

Cette méthode combinée couplant l'utilisation du RPG avec de l'analyse d'imagerie satellitaire a permis de

GLOSSAIRE

BD TOPO® : composante du référentiel à grande échelle (RGE®) distribuée par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), la BD TOPO® contient une description vectorielle des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique, exploitable à des échelles allant du 1 : 5 000 au 1 : 50 000. Elle permet de couvrir de manière cohérente l'ensemble des entités géographiques et administratives fournies par l'IGN (réseau routier, bâtiments, relief, etc.).

BD ORTHO® : autre composante du RGE®, la BD ORTHO® est constituée d'orthophotographies, soit un assemblage numérisé de photographies aériennes sur lesquelles ont été corrigées les déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif.

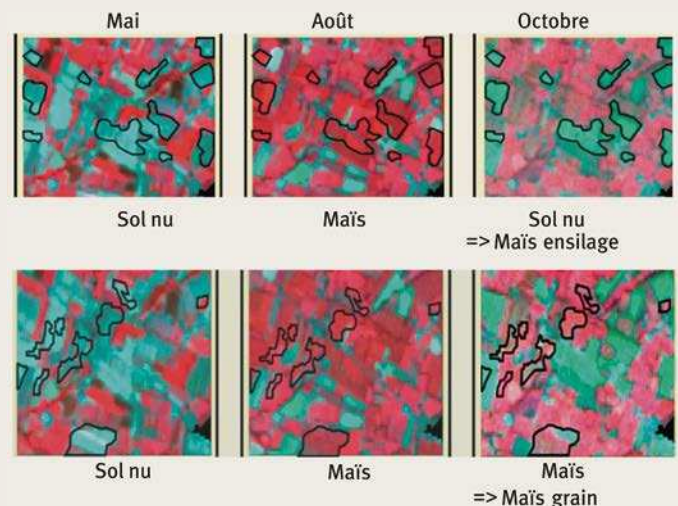
Digestion anaérobie : processus biologique de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène assuré par des micro-organismes. Le biogaz produit est constitué essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone. Le processus existe naturellement notamment chez les ruminants (prédigestion dans le rumen), dans les tourbières et sédiments marins. Ce phénomène naturel peut être reproduit dans des digesteurs pour traiter des déchets et effluents d'élevage. Le biogaz produit est alors valorisé pour produire électricité et chaleur. Le procédé génère un résidu appelé « digestat ».

Géoréférencement : action qui consiste à relier un objet et les données qui y sont associées à sa position dans l'espace par rapport à un système de coordonnées géographiques.

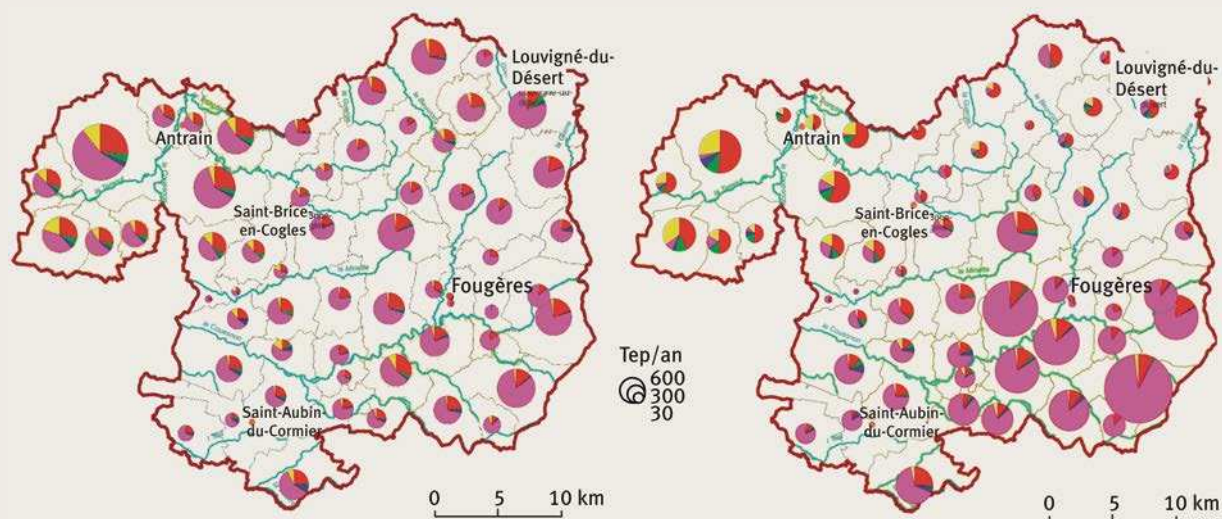
Injection dans le réseau de gaz naturel : l'injection de biométhane dans le réseau de gaz est autorisée depuis le 21 novembre 2011, par les décrets n° 2011-1594 (conditions de vente du biométhane aux fournisseurs de gaz naturel), n° 2011-1595 (compensation des charges de service public portant sur l'achat de biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel), n° 2011-1596 (garanties d'origine du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel) et n° 2011-1597 (conditions de contractualisation entre producteurs de biométhane et fournisseurs de gaz naturel). Ils ont été complétés par quatre arrêtés du 23 novembre 2011, dont un fixant la nature des intrants dans la production de biométhane pour l'injection dans les réseaux de gaz naturel.

SIG (système d'information géographique) : ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées.

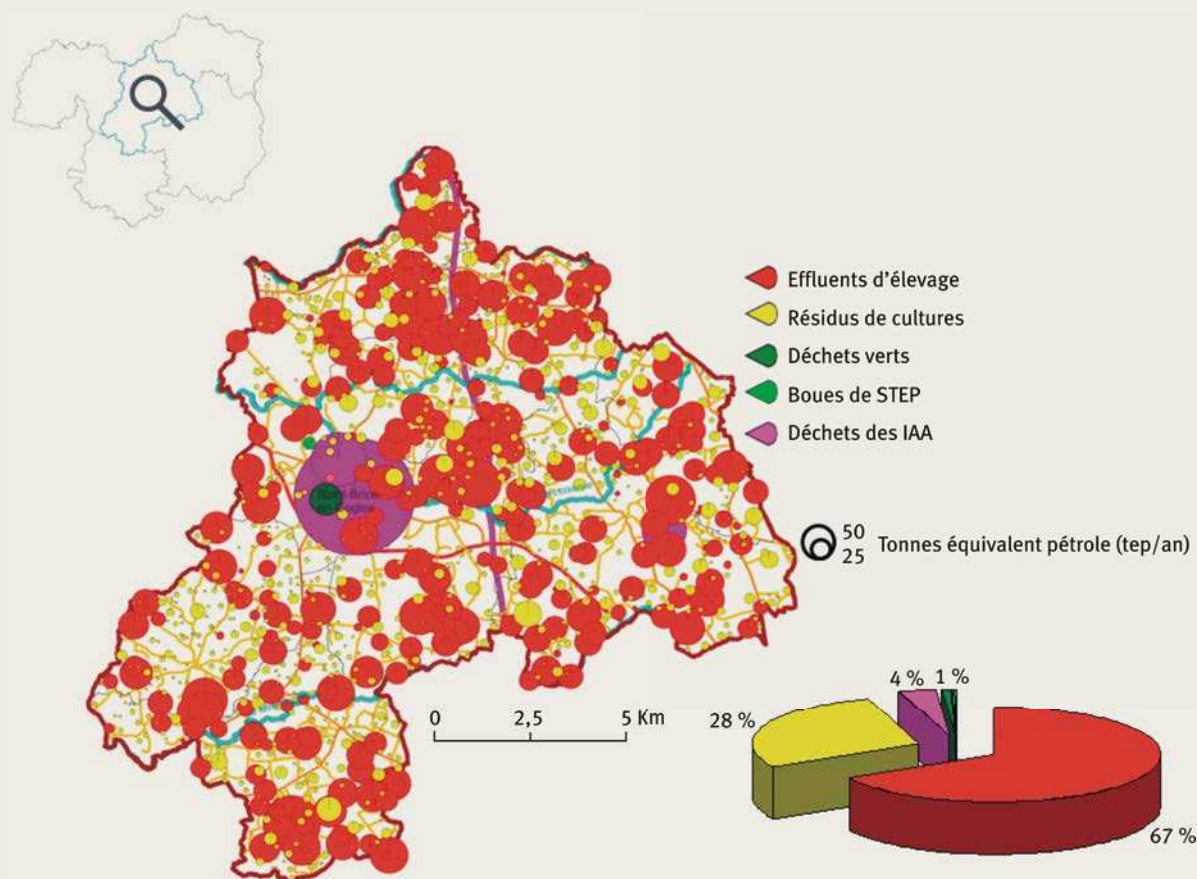
❸ Distinction maïs ensilage/maïs grain par analyse d'imagerie Landsat ETM+, bandes 4,3,2.



- ❷ Comparaison de la distribution spatiale des résidus de culture, application d'une méthode statistique globale (à gauche) ou d'une méthode par combinaison du RPG et d'analyse d'images Landsat ; rouge = blé d'hiver, rose = maïs grain, vert = orge, jaune = colza, bleu = autres céréales.



- ❸ Potentiel énergétique des bio-ressources sur la communauté de communes du Coglais.



mettre en évidence une distribution spatiale de la culture du maïs grain, concentrée au sud-est du Pays de Fougères. La figure ④ représente (à gauche) l'erreur qui serait faite en utilisant une valeur globale à l'échelle du département (30 % de la culture de maïs est en maïs grain) et appliquée à chaque commune en comparaison d'une géolocalisation précise (à droite) utilisant une combinaison du RPG et d'analyses d'images par télédétection. Cette observation souligne le fait que le diagnostic local nécessite une méthodologie précise d'identification des bio-ressources.

Spatialisation et quantification du potentiel énergétique

La conversion de l'ensemble des bio-ressources en teneur équivalente, soit en tonne équivalent pétrole (tep), permet de visualiser le potentiel énergétique de chaque substrat sur le territoire (figure ⑤).

L'application de cette démarche sur le Pays de Fougères a mis en évidence, pour ce territoire, un gisement de 24 802, 10 369, 1 395, 268, 141 et 62 tep/an respectivement pour les : effluents d'élevage, résidus de récolte, déchets des IAA, déchets verts, boues de stations d'épuration et déchets de la restauration collective, totalisant 37 037 tep/an. Les ressources agricoles, majoritaires à 95 % se caractérisent par une forte dispersion géographique. Les autres substrats, industriels et issus des collectivités, constituent un potentiel global plus faible mais représentent parfois un fort potentiel énergétique local. En supposant une consommation moyenne de 3,97 tep/français.an (Agence internationale de l'énergie, Key World Energy Statistics, 2011), il serait possible de substituer 11 % de l'énergie totale consommée par les résidents du Pays de Fougères, en supposant que toute l'énergie potentielle est récupérée. Toutefois, la disponibilité totale de ces bio-ressources est peu probable due notamment aux distances de collecte qui doivent être raisonnées.

Distances maximales de collecte

Afin d'obtenir une estimation plus réaliste du gisement disponible en un lieu fixé du territoire, une distance maximale de collecte a été définie pour chaque bio-ressource. La méthode consiste à établir une telle distance variable en fonction de l'énergie potentielle du substrat considéré. Dans cette étude, l'énergie dépensée pour la collecte du substrat a été fixée à 2 % de son potentiel énergétique (figure ⑥). Dans une seconde phase, l'utilisation d'outils d'analyse spatiale en mode matriciel rend possible la somme en tout point du territoire des potentiels énergétiques en contraignant cette somme aux distances maximales définies. Le résultat est une grille qui a été établie à une résolution de 100 m afin d'obtenir un bon compromis entre temps de calcul et précision.

Cartographie des zones préférentielles d'implantation

La géolocalisation des bio-ressources et leur conversion en tep rend possible l'obtention d'une carte d'aptitude qui tient compte d'une distance de collecte réaliste pour chaque ressource et qui prend également en considé-

ration les contraintes réglementaires (zones naturelles, distances aux habitations, etc.). L'enchaînement des traitements SIG nécessaires a été automatisé afin de faciliter la modification de paramètres et de permettre une réutilisation du modèle sur d'autres territoires. Des traitements SIG réalisés en mode réseau ont permis de prendre en compte le réseau routier réel et ont montré qu'il est possible sur ce territoire, de valoriser 7 600 tep/an au maximum si une seule installation est implantée sur le Pays de Fougères (figure ⑦, en haut). Pour cela, une grille de 260 points résultant d'un échantillonnage systématique régulier a été créée puis traitée par le solveur « Location-Allocation, *maximize market share* » de manière itérative. Cet algorithme permet une optimisation et une répartition équilibrée des ressources pour un nombre de sites candidats fixé par l'utilisateur. Initialement, cet outil a été conçu pour le geomarketing (optimisation d'implantation d'un nouveau point de vente) mais trouve ici une application tout aussi adaptée. Ainsi, une modélisation simultanée de trois installations collectives de méthanisation avec accès concurrentiel aux bio-ressources a été testée (figure ⑦, en bas). Dans ce cas, une valorisation totale de 9 850 tep/an serait possible, soit 30 % de plus qu'une simulation « mono-site ».

Il semblerait donc qu'augmenter le nombre d'unités de méthanisation, pour ce territoire, ne présente pas un intérêt évident dès lors que les coûts fixes d'investissement sont considérés. D'autre part, la comparaison des deux cartes de la figure ⑦ met en évidence que la meilleure implantation des trois sites simultanés (3 740 tep) ne se situe pas au même emplacement que l'implantation optimale « mono-site ». Dépendant de l'offre en ressources disponibles, la production de biogaz d'un futur projet et les utilisations concurrentes sont donc des facteurs importants à prendre en compte pour des simulations plus précises. Par ailleurs, les simulations réalisées actuellement sont basées sur le seul critère du potentiel énergétique et ne prennent pas en compte d'autres facteurs tels que les enjeux environnementaux.

⑥ Distances maximales de collecte définies en fonction du potentiel énergétique des substrats.

| Bio-ressource | D* | Exemple |
|--|----|---------|
| Fumier bovin | 5 | |
| Lisier porcin | 2 | |
| Résidus de cultures | 50 | |
| Boues de station d'épuration | 4 | |
| Déchets de restauration collective | 55 | |
| Déchets verts | 10 | |
| IAA type 1 (boues) | 4 | |
| IAA type 2 (déchets d'abattoirs) | 25 | |
| IAA type 3 (graisses, déchets de viande) | 50 | |

* Distance maximale de collecte (km)

Optimum

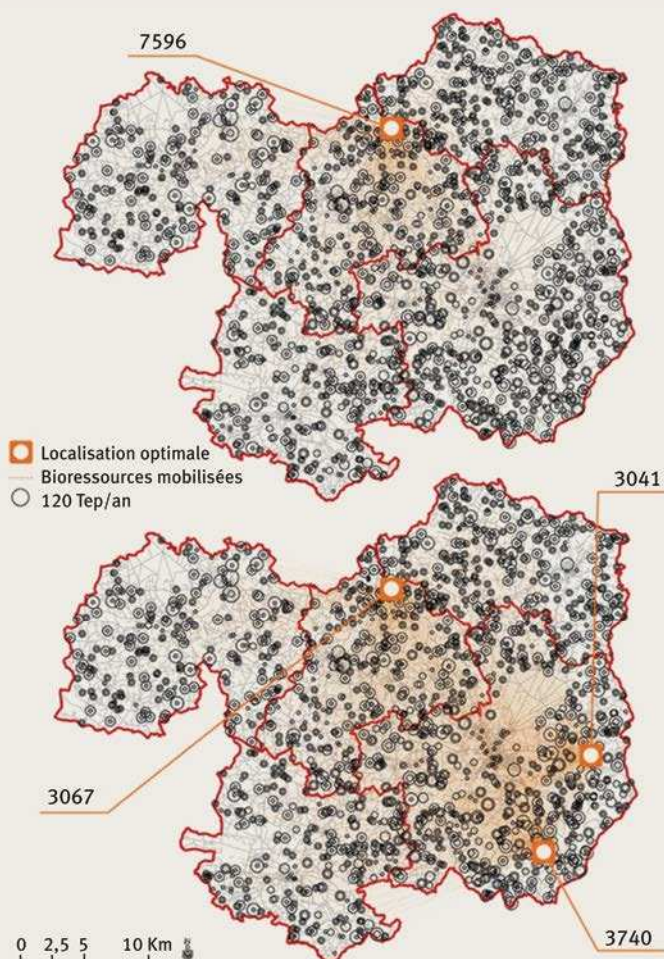
Par exemple, les apports de co-substrats riches en azote peuvent poser problème pour le retour au sol des digestats dans des zones en excédent structurel. Pour traiter ces aspects spécifiques dans une évaluation globale des performances environnementales d'un projet de méthanisation, le recours à une méthodologie éprouvée, l'analyse du cycle de vie, est nécessaire. Ainsi, l'analyse comparative de trois scénarios contrastés de méthanisation centralisée a été testée sur ce même territoire du Pays de Fougères (Aissani *et al.*, 2012).

Conclusion

La valorisation d'une partie du potentiel bioénergétique total du territoire étudié contribuerait de façon non négligeable aux engagements pris sur la part d'énergies renouvelables à atteindre à l'horizon 2020. L'outil de simulation spatialisé qui a été construit permet d'évaluer en tout point du territoire l'énergie potentielle disponible et la modélisation de plusieurs installations simultanées. L'automatisation des traitements a permis de construire un protocole d'analyse spatiale et un outil transposable à d'autres territoires. Une étude complémentaire a été

+menée sur la faisabilité d'injecter le biogaz produit dans le réseau de distribution en gaz naturel et a conduit à une autre cartographie d'aptitude du territoire, fortement dépendante des besoins locaux en énergie. Un prolongement des travaux entrepris pourrait consister à valoriser les données acquises à ces échelles très précises à des fins de généralisation à des territoires plus vastes. Par exemple, le traitement par photo-interprétation étant une approche à réserver à l'échelle locale compte-tenu du temps requis pour cette opération, l'identification de clés de passage d'une grande échelle à une plus petite échelle, pourrait être explorée afin d'approcher le même diagnostic en mobilisant des données plus globales. Par ailleurs, par rapport à un scénario de référence d'épandage « classique » d'effluents d'élevage, les effets induits de la méthanisation tels que l'apport sur les sols d'azote exogène lié aux co-substrats et l'export de carbone via les résidus de cultures sont des paramètres à considérer dans une approche plus globale. Ainsi, le développement de ces méthodes d'évaluation spatialisée du potentiel énergétique trouve un lien immédiat avec les démarches d'analyses environnementales utilisant l'analyse du cycle de vie comme méthode d'évaluation de plusieurs scénarios de méthanisation collective. Des travaux en cours consistent à combiner SIG et ACV, le but ultime étant de construire un modèle maximisant la valorisation d'énergie issue de bio-ressources en conjonction avec un faible impact environnemental. ■

7 Optimisation d'implantations en mode réseau ; en haut : une implantation, en bas : trois implantations simultanées.



Les auteurs

Thierry BIOTEAU, Fabrice BÉLINE, Faustine LAURENT et Romain GIRAULT

Irstea, centre de Rennes, UR GERE,
Gestion environnementale et traitement biologique des déchets
17 Avenue de Cucillé – CS 64427 – 35044 Rennes
/Université européenne de Bretagne
✉ thierry.bioteau@irstea.fr
✉ fabrice.beline@irstea.fr
✉ faustine.laurent@irstea.fr
✉ romain.girault@irstea.fr

Oleksander TRETYAKOV et Florian BORET

Université Rennes 2 Bretagne
Département de géographie et d'aménagement de l'espace
Place du Recteur Henri Le Moal – 35043 Rennes Cedex
✉ biowatt@ukr.net
✉ florian.boret@laposte.net

Maryna BALYNSKA

Université nationale de Kharkiv V.N. Karazine
Chaire de la géographie physique et cartographie
4 place Svobody – 61077 Kharkiv – Ukraine
✉ maricouniver@ukr.net

Remerciements

Ce travail a été soutenu financièrement par le programme « Pour et sur le développement régional Grand-Ouest (PSDR-GO). Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude à un groupe d'étudiants (IDROVO, C. ; BRUGIONI, I. ; BESNARD, A. ; JUHEL, N. ; LE CLEC'H, S. ; BORET, F.) et leur tuteur académique QUESSEVEUR, E., pour leurs contributions dans la modélisation SIG. Les auteurs remercient également MARCHAND, F., et DIARD, P., du Pays de Fougères, pour la fourniture de données.



EN SAVOIR PLUS...

■ **AISSANI, L., COLLET, A., BÉLINE, F.**, 2012, LCA of a collective biogas plant to manage manure in a French intensive farming and agroindustry area, in: *ORBIT 2012, Proceedings of the International Conference on Global assessment for organic resources and waste management*, Rennes, France.

■ **ALMANSOUR, E., BONNET, J.-F., HEREDIA, M.**, 2012, Potentiel de production de biogaz à partir de résidus agricoles ou de cultures dédiées en France, *Sciences Eaux & Territoires*, n°7, p. 64-72.

■ **MA, J., SCOTT, N.R., DEGLORIA, S.D., LEMBO, A.J.**, 2005, Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS, *Biomass and Bioenergy*, n° 28, p. 591-600.